

Ricerca di Sistema elettrico



Servizi energetici aggiuntivi: Sviluppo di un software pubblico web-based per l'ottimizzazione di Comunità energetiche locali (LA1.27)

R. Assogna, E. Marchegiani, L. Ciabattoni, M. Rossi, G. Comodi



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

Servizi energetici aggiuntivi: Sviluppo di un software pubblico web-based per l'ottimizzazione di Comunità energetiche locali

LA 1.27 - Servizi energetici aggiuntivi: Sviluppo di un software pubblico web-based per l'ottimizzazione di Comunità energetiche locali

R. Assogna, E. Marchegiani, L. Ciabattoni, G. Comodi (Università Politecnica delle Marche)

Dicembre 2024

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: Decarbonizzazione

Progetto: Tema di ricerca 1.7 - Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali

Linea di attività: 1.27

Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA

Responsabile del Work Package: Angelo Frascella, ENEA

Responsabile Linea di Attività: Gabriele Comodi, UNIVPM

Mese inizio previsto: 13

Mese inizio effettivo: 13

Mese fine previsto: 36

Mese fine effettivo: 36

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: Servizi energetici aggiuntivi

Indice

1	Risultati previsti	4
2	Risultati ottenuti.....	5
2.1	Piattaforma SIMBA	5
2.2	Test del prodotto	5
3	Prodotti previsti	9
4	Prodotti ottenuti.....	10
5	Analisi degli scostamenti su attività e risultati.....	14
6	Sintesi delle attività svolte	15
7	Dettaglio delle attività svolte.....	16
8	Pubblicazioni scientifiche.....	19
9	Eventi di disseminazione	20
	Riferimenti bibliografici e sitografici	21

Indice delle figure

Figura 1 Homepage della piattaforma "SIMBA"	5
Figura 2 Andamento cumulativo di costi e risparmi annui	6
Figura 3 Andamento medio giornaliero dell'energia prodotta e consumata	7
Figura 4 Andamento medio settimanale dell'energia prodotta e consumata	7
Figura 5 Andamento medio mensile dell'energia prodotta e consumata.....	7
Figura 6 Sezione del modulo per l'inserimento di dati iniziali sulla regione e dimensione del comune	10
Figura 7 Interfaccia per l'inserimento dei dati relativi a un impianto fotovoltaico	11
Figura 8 Form di inserimento dati di consumo	11
Figura 9 Confronto tra l'energia consumata nelle ore diurne, l'energia rinnovabile prodotta e la differenza tra produzione e consumo	12
Figura 10 Distribuzione media giornaliera dell'energia elettrica prodotta e consumata	12

1 Risultati previsti

Il presente allegato tecnico si riferisce al Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024, in particolare all'Obiettivo "Decarbonizzazione" e al Work Package WP1 - "Comunità energetiche smart", linea di attività 27, intitolata "Servizi energetici aggiuntivi", parte integrante del progetto "Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali".

Come da capitolato i risultati previsti consistono nello sviluppo di un prodotto per la simulazione di Comunità Energetiche e per la loro ottimizzazione tecnico, economico e ambientale. Il presente report tecnico documenta l'attività svolta a tal fine.

2 Risultati ottenuti

2.1 Piattaforma SIMBA

È stata realizzata la piattaforma "SIMBA (Simulator for CACER Integration & Multi-Energy Best Assessment)" (Figura 1) gratuita, in formato applicazione web-based, accessibile e utilizzabile direttamente dal PC degli utenti tramite il seguente link: "https://simba-univpm-enea.streamlit.app". La piattaforma si compone di due sezioni principali: "Sezione CACER" dedicata alla valutazione di scenari di autoconsumo collettivo da fonti rinnovabili; "Sezione Multivettore energetico" dedicata all'integrazione di diverse fonti energetiche. Entrambe le sezioni implementano logiche di simulazione e ottimizzazione multi-obiettivo e saranno esplorate nel dettaglio nel paragrafo 4.

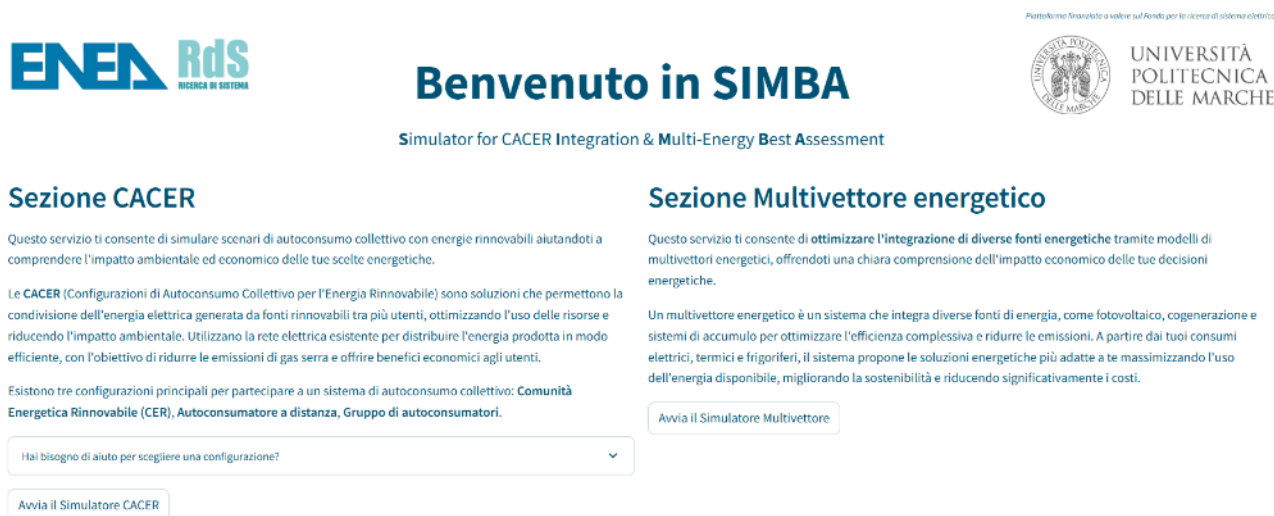


Figura 1 Homepage della piattaforma "SIMBA"

2.2 Test del prodotto

Il Simulatore Multivettore Energetico è stato testato e validato utilizzando dati reali, rappresentativi delle esigenze di una struttura complessa come l'Università Politecnica delle Marche. Gli input forniti al simulatore comprendono i profili di consumo elettrico, termico e frigorifero registrati dall'ateneo durante l'anno 2023. I consumi totali annuali rilevati sono:

- Consumi elettrici: 3.602.058 kWh, con una mediana di 286,25 kWh e un intervallo interquartile (IQR) compreso tra 194,763 kWh e 286,25 kWh.
- Consumi termici: 1.947.033 kWh, con una mediana di 20 kWh e un IQR che varia da 10 kWh a 72 kWh.
- Consumi frigoriferi: nulli.

Dopo un'analisi dettagliata, il simulatore ha individuato come ottimale il seguente mix tecnologico per soddisfare i fabbisogni energetici dell'università:

- Impianto fotovoltaico con una capacità di 286 kW, per sfruttare al meglio l'energia solare disponibile.
- Impianto di cogenerazione da 989 kW, per produrre simultaneamente energia elettrica e termica con un'elevata efficienza.
- Sistema di accumulo energetico con una capacità di 27 kWh, per garantire una maggiore flessibilità nella gestione dell'energia prodotta e consumata.

Il costo stimato per l'installazione di queste tecnologie ammonta a circa 1405900€. Tuttavia, grazie alla significativa riduzione della dipendenza dalla rete e all'energia autoprodotta,

l'investimento risulterebbe completamente ammortizzato in un periodo di circa 9 anni, come evidenziato nel grafico riportato in Figura 2. Quest'ultimo mostra l'andamento cumulativo dei costi e dei risparmi annuali, evidenziando chiaramente come, a partire dal decimo anno, l'investimento inizi a generare risparmi netti. In particolare, tali risparmi derivano dalla riduzione delle bollette energetiche, grazie all'autoconsumo.

Andamento Cumulativo di Costi e Risparmi Annuali ⓘ

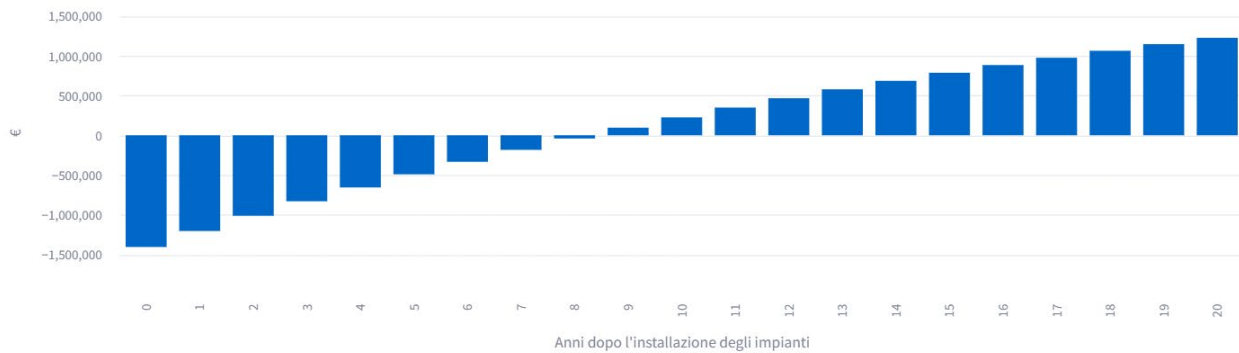


Figura 2 Andamento cumulativo di costi e risparmi annui

I grafici di distribuzione dell'energia evidenziano come il sistema riesca a ottimizzare la produzione e il consumo:

- Distribuzione media giornaliera dell'energia elettrica (Figura 3): la produzione di energia elettrica (rappresentata in azzurro chiaro) si allinea al profilo dei consumi (indicato in blu scuro) durante l'intera giornata, evidenziando l'efficacia dell'ottimizzatore nell'individuare il mix ottimale di tecnologie in base alla produzione disponibile. Si osserva un leggero surplus nelle ore notturne, quando i consumi sono più bassi, che può essere accumulato e sfruttato nelle ore diurne, caratterizzate da una domanda leggermente superiore alla produzione. Questa gestione intelligente riduce al minimo la dipendenza dalla rete, promuovendo un alto livello di autoconsumo.
- Distribuzione media giornaliera dell'energia termica (Figura 3): l'energia termica prodotta (in azzurro chiaro) è inferiore a quella consumata (in blu scuro). Questa scelta riflette il giusto bilanciamento tra garantire una produzione adeguata e ridurre i consumi di carburante, evitando eccessi di produzione che porterebbero a inefficienze. Il mix tra energia termica autoprodotta e consumata è quindi progettato per ridurre al minimo gli sprechi.

I grafici settimanali (Figura 4) e mensili (Figura 5) confermano queste tendenze su scala più ampia. Per l'energia elettrica, la produzione e il consumo mantengono un equilibrio costante, con surplus notturni che bilanciano i picchi diurni. Per l'energia termica, si osserva una distribuzione simile, dove la produzione è ottimizzata per coprire parte del consumo senza eccedere, garantendo sostenibilità, risparmio sui carburanti e risparmio in bolletta.

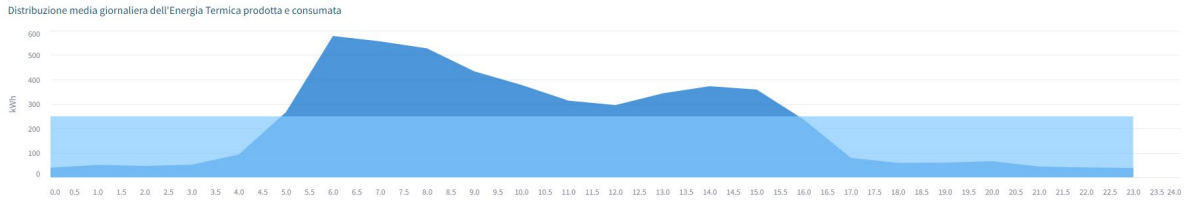
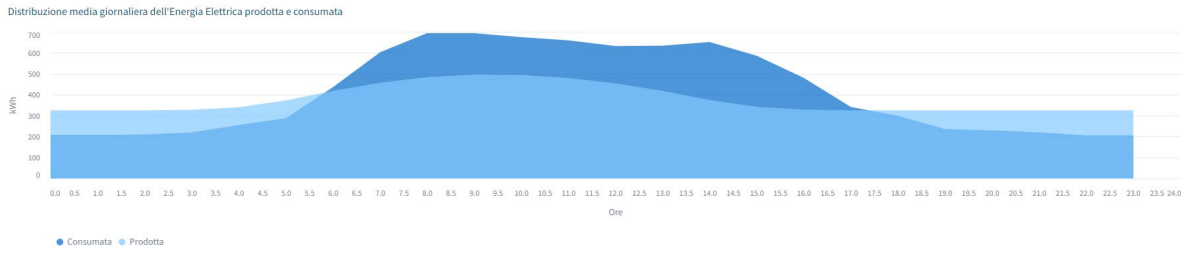


Figura 3 Andamento medio giornaliero dell'energia prodotta e consumata

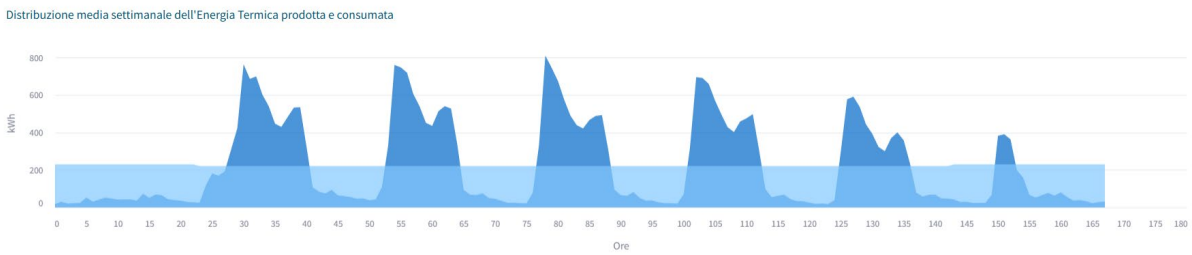
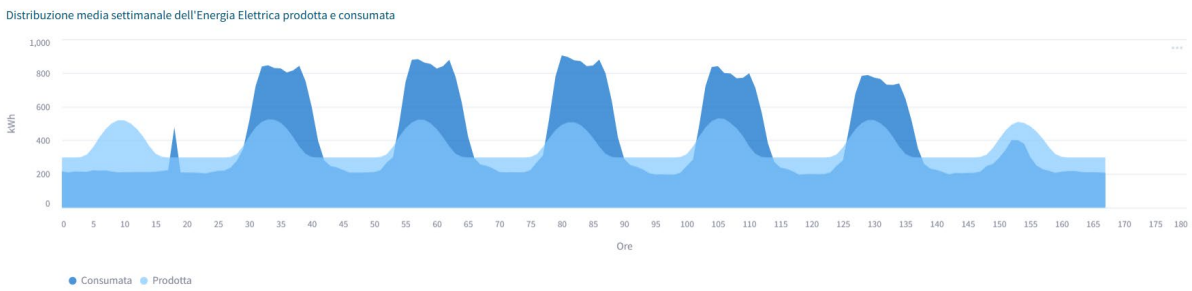


Figura 4 Andamento medio settimanale dell'energia prodotta e consumata

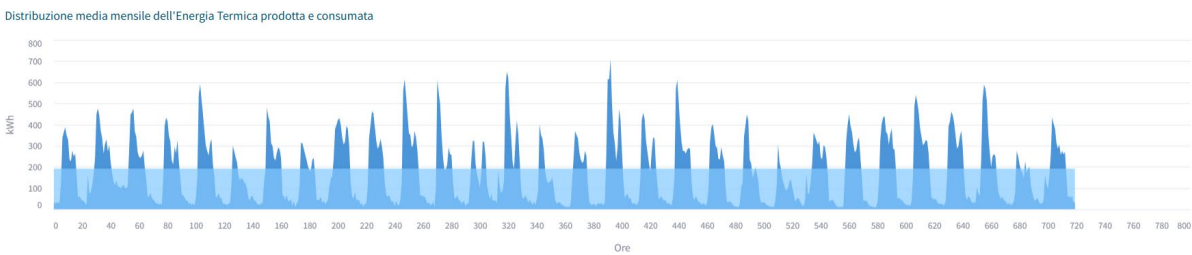
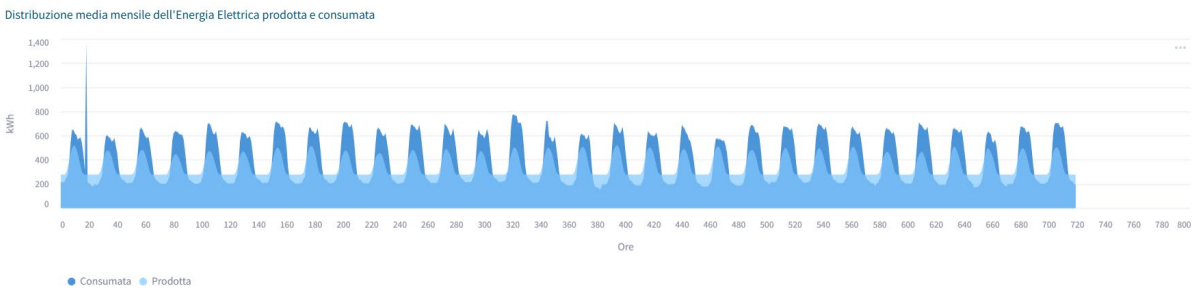


Figura 5 Andamento medio mensile dell'energia prodotta e consumata

Un elemento significativo emerso dall'analisi riguarda la decisione del simulatore di proporre un impianto di cogenerazione anziché un sistema di trigenerazione o una pompa di calore reversibile. Questa scelta è strettamente legata ai dati di input forniti, i quali indicano consumi frigoriferi nulli. In assenza di tale domanda energetica, il simulatore ha determinato che l'introduzione di una componente per la produzione di energia frigorifera non fosse necessaria, garantendo così un mix energetico ottimizzato senza inutili complessità tecnologiche. Questa scelta dimostra la capacità del sistema di rispondere con precisione alle reali esigenze operative, massimizzando l'efficienza e minimizzando le spese non necessarie.

I risultati dimostrano come il simulatore Multivettore Energetico sia stato in grado di identificare un mix tecnologico efficiente e sostenibile, ottimizzando l'autoproduzione e riducendo i costi operativi. Questo esempio ha permesso di confermare la validità del simulatore nel generare risultati a partire da dati reali.

3 Prodotti previsti

Il progetto prevede lo sviluppo di una piattaforma, gratuita ed accessibile, capace di elaborare l'intera filiera dei dati inseriti dall'utente. Questi dati saranno poi processati da un software di simulazione e ottimizzazione. I risultati delle elaborazioni saranno restituiti sotto forma di output grafici chiari e facilmente interpretabili, garantendo un'esperienza utente intuitiva e immediatamente fruibile. L'obiettivo è consentire a tutti gli utenti, indipendentemente dal livello di competenza tecnica, di utilizzare lo strumento in modo efficace, per affrontare le sfide della transizione energetica e promuovere modelli sostenibili di gestione dell'energia. Pertanto, oltre allo sviluppo della piattaforma, è previsto il rilascio di un manuale operativo di funzionamento del software.

La piattaforma sarà in grado di simulare e ottimizzare le configurazioni delle Comunità Energetiche, promuovendo soluzioni multi-obiettivo che considerano esigenze tecniche, ambientali ed economiche. Questo rappresenterà un importante contributo per il raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità a livello locale e nazionale.

Il progetto mira, inoltre, a fornire uno strumento di ottimizzazione che integri diverse tecnologie di conversione e stoccaggio dell'energia, tenendo in considerazione gli aspetti economici del contesto di applicazione al fine di favorire l'efficienza energetica.

L'interfaccia della piattaforma sarà progettata per consentire agli utenti un inserimento semplice e intuitivo dei dati di ingresso necessari per le simulazioni e le ottimizzazioni.

Inoltre, l'interfaccia della piattaforma sarà dotata di strumenti per la visualizzazione dei dati di output, progettati per adattarsi a diversi livelli di competenza, rendendo i risultati facilmente interpretabili sia per esperti tecnici che per operatori meno specializzati. L'interfaccia offrirà la possibilità di generare un report automatico per agevolare il processo decisionale e la comunicazione dei risultati.

Per riassumere la piattaforma prevede i seguenti elementi:

- interfaccia web che permette l'inserimento dei dati da parte dell'utente;
- database di tecnologie di conversione e stoccaggio dell'energia;
- sistemi di processamento dei dati; nel dettaglio:
 - sistema di ottimizzazione multi-obiettivo;
 - sistema di simulazione dei profili di carico elettrico, termico, frigorifero e di colonnine di ricarica elettriche, qualora non fossero disponibili dati reali;
- interfaccia di output dei risultati;
- sistema per la redazione automatica di un report.

4 Prodotti ottenuti

La piattaforma "SIMBA" è stata progettata per supportare la simulazione e l'ottimizzazione di configurazioni energetiche locali, garantendo uno strumento versatile e adatto a molteplici esigenze. La piattaforma si articola in due macro-sezioni principali:

- "Sezione CACER": sezione dedicata al simulatore delle configurazioni di autoconsumo per la condivisione dell'energia rinnovabile (CACER). Questa sezione consente di simulare scenari di autoconsumo collettivo con energie rinnovabili aiutando l'utente a comprendere l'impatto ambientale ed economico delle sue scelte energetiche ottimizzando l'uso delle risorse. Vengono considerate nel dettaglio le tre possibili configurazioni di CACER: Comunità Energetica Rinnovabile (CER), Autoconsumatore a distanza, Gruppo di autoconsumatori. Per ognuna delle configurazioni vengono presentati risultati dedicati e specifici per il singolo caso customizzati in base alle informazioni inserite dall'utente. Viene garantita la multi-obiettività del processo attesa, grazie alla considerazione simultanea di criteri economici, ambientali e tecnici.
- "Sezione Multivettore energetico": questa sezione è dedicata al simulatore multivettore energetico. È pensata per integrare e ottimizzare diverse tecnologie di conversione e stoccaggio dell'energia a partire dai consumi elettrici, termici e frigoriferi dell'utente.

Le due macro-sezioni descritte sono accessibili tramite un'interfaccia grafica intuitiva che guida l'utente nell'inserimento dei propri dati in modo semplice e strutturato. Gli input includono profili di carico elettrico, termico e frigorifero, dati socio-economici, informazioni economiche e climatiche. Alcuni esempi dell'interfaccia della piattaforma per l'inserimento dei dati sono mostrati in Figura 6 e Figura 7 per la sezione CACER e Figura 8 per la sezione Multivettore energetico. Nel caso in cui i profili di carico non siano disponibili, il software è in grado di stimarli utilizzando il modulo di simulazione dedicato, che copre sia i profili energetici sia l'impatto delle infrastrutture di ricarica per veicoli elettrici.

Seleziona la tua regione

Seleziona un'opzione

Il comune dove hai l'impianto fotovoltaico o dove vuoi costruirlo, ha meno di 5000 abitanti?

Si No

Figura 6 Sezione del modulo per l'inserimento di dati iniziali sulla regione e dimensione del comune

Inserisci la data di entrata in esercizio dell'impianto fotovoltaico

17/02/2025

Inserisci la potenza dell'impianto fotovoltaico in kW

0,3

Di quanto vuoi potenziare il tuo impianto fotovoltaico in kW?

0

Figura 7 Interfaccia per l'inserimento dei dati relativi a un impianto fotovoltaico

Non conosci i consumi orari? Inserisci solo i consumi totali annui qui sotto [↔](#)

Inserisci i consumi elettrici in kWh

0

Inserisci i consumi termici in kWh termici

0

Inserisci i consumi frigoriferi in kWh termici

0

Figura 8 Form di inserimento dati di consumo

I dati di input vengono processati dal software di simulazione e ottimizzazione multi-obiettivo. Nella sezione CACER, il simulatore elabora le informazioni fornite dall'utente utilizzando algoritmi che tengono conto di criteri tecnici, economici e ambientali. È in grado di fornire un'analisi dettagliata sulla produzione di energia da fonti rinnovabili, sulla capacità di coprire i propri consumi con tali fonti, sui benefici economici e ambientali ottenibili e sulle specifiche caratteristiche necessarie per raggiungere questi obiettivi. Inoltre, propone strategie mirate per ridurre l'impatto ambientale attraverso un utilizzo più efficiente delle fonti sostenibili. Nella sezione dedicata al multivettore energetico, il software utilizza l'algoritmo di ottimizzazione Particle Swarm Optimization (PSO) (Kennedy & Eberhart, 1995) e si basa su un database che integra diverse tecnologie di conversione e stoccaggio dell'energia. Il database comprende impianti fotovoltaici (PV), sistemi di cogenerazione a gas, sistemi di trigenerazione a gas, pompe di calore reversibili e batterie per lo stoccaggio energetico. A partire dalle informazioni fornite dall'utente, il sistema suggerisce le configurazioni ottimali per massimizzare il risparmio economico e, al contempo, tutelare l'ambiente.

I risultati delle simulazioni e delle ottimizzazioni sono visualizzati tramite l'interfaccia grafica e presentati sia in formato testuale che grafico, per renderne più semplice e immediata la comprensione. Alcuni esempi di formati grafici sono riportati in Figura 9 (risultato della

sezione CACER) e Figura 10 (risultati della sezione Multivettore energetico). Inoltre, l'interfaccia di output include una funzione per la generazione automatica di un report che consente di esportare i risultati in formato PDF in modo pratico e veloce.

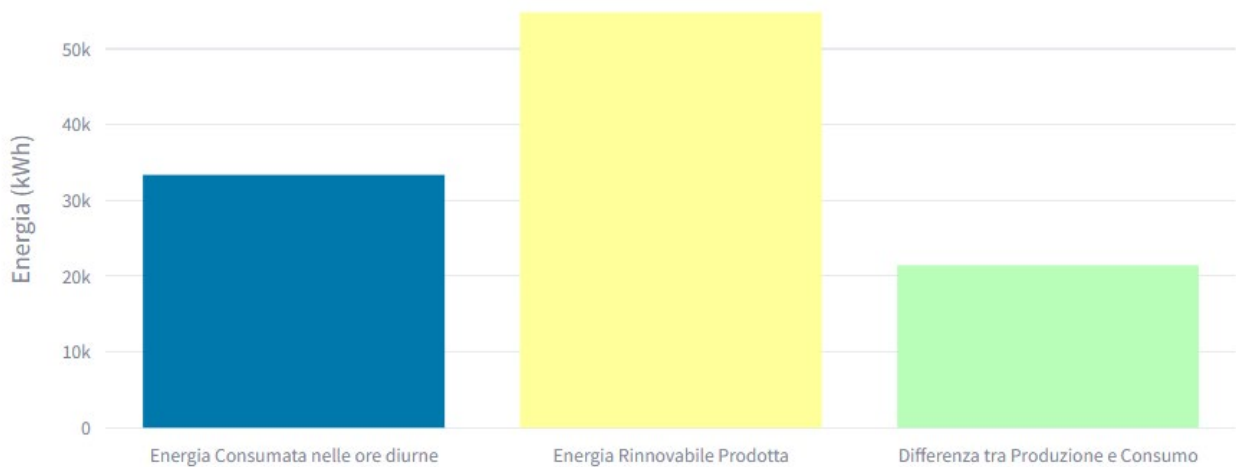


Figura 9 Confronto tra l'energia consumata nelle ore diurne, l'energia rinnovabile prodotta e la differenza tra produzione e consumo

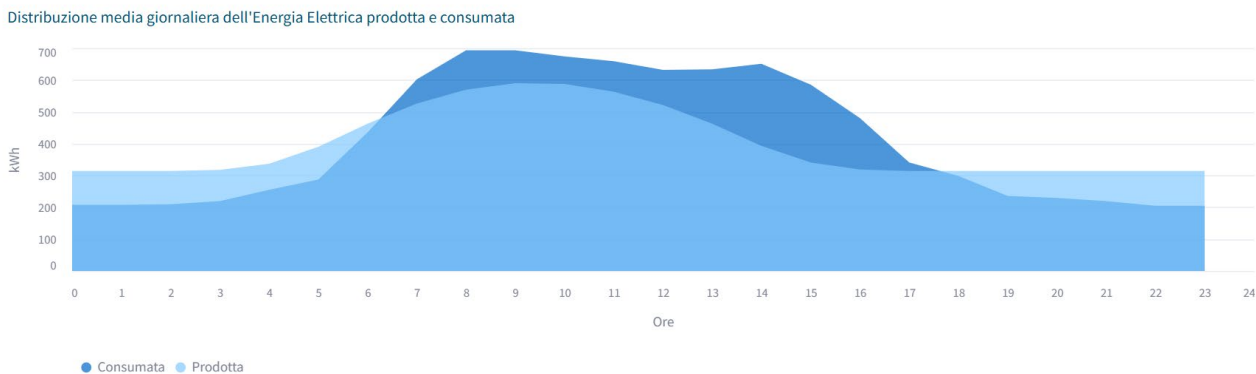


Figura 10 Distribuzione media giornaliera dell'energia elettrica prodotta e consumata

Il progetto contiene gli elementi attesi espressi nel capitolo 3, offrendo uno strumento accessibile e intuitivo, capace di elaborare i dati inseriti dall'utente restituendo output grafici e report automatici facilmente interpretabili. Come previsto, è stata data particolare enfasi al caso delle CER. In aggiunta agli obiettivi del capitolato, sono state considerate tutte le tre configurazioni di CACER fornendo uno strumento più completo. Inoltre, un valore aggiunto è rappresentato dall'integrazione di un'analisi approfondita della normativa vigente nel contesto CACER (Decreto Del Ministro Dell'ambiente e Della Sicurezza Energetica 7 Dicembre 2023, 2023) (TIAD, 2023). Questa analisi ha consentito di sviluppare un prodotto che tenga conto anche degli incentivi previsti dalla normativa all'interno del processo di ottimizzazione, garantendo soluzioni che massimizzano i benefici economici per gli utenti e favoriscono la sostenibilità delle configurazioni energetiche proposte.

Grazie all'ottimizzazione delle configurazioni CACER e multivettoriali, lo strumento rende i principi della sostenibilità energetica accessibili a un pubblico più ampio. L'inclusione di incentivi e criteri economici promuove una maggiore adozione di modelli di CACER, avvicinando anche gli utenti meno esperti al mondo della transizione energetica. Attraverso un'interfaccia intuitiva e ai risultati presentati in modo chiaro, la piattaforma educa e coinvolge

gli utenti, rendendo più semplice comprendere e adottare soluzioni sostenibili. La capacità di integrare dati normativi, incentivi economici e tecnologie energetiche diversificate rappresenta un importante contributo verso il raggiungimento degli obiettivi di transizione energetica sia a livello locale che nazionale.

La piattaforma rappresenta un contributo significativo per il sistema elettrico nazionale. Infatti, incentivando la produzione di energia rinnovabile e promuovendo l'autoconsumo dell'energia prodotta localmente, si contribuisce a ridurre il carico sulla rete elettrica.

Per agevolare l'utilizzo della piattaforma, è stato rilasciato anche un manuale operativo di funzionamento del software, in allegato al presente report.

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Nel corso del progetto, è stato necessario un adeguamento rispetto al capitolato relativo all'utilizzo del software di simulazione/ottimizzazione. Sebbene inizialmente fosse previsto l'impiego di un simulatore/ottimizzatore sviluppato da ENEA, durante lo sviluppo dell'applicazione web-based ci si è resi conto delle difficoltà di integrazione. L'utilizzo del simulatore ENEA avrebbe infatti richiesto specifiche autorizzazioni per ogni accesso, con potenziali impatti sulla fluidità operativa. Pertanto, si è deciso di sviluppare internamente un software dedicato con il supporto di ENEA. Lo sviluppo di una soluzione su misura ha permesso di garantire maggiore flessibilità e autonomia operativa, senza impatti significativi su tempi e obiettivi prefissati.

6 Sintesi delle attività svolte

Le attività si sono articolate in sette fasi:

- Indagine bibliografica su tecniche di ottimizzazione, modelli energetici, architetture software, normative sulle CER e analisi di mercato e abitudini di consumo.
- Creazione del database di tecnologie di conversione e stoccaggio dell'energia.
- Sviluppo di un software per simulare profili di carico energetico e colonnine di ricarica per veicoli elettrici, generando modelli realistici e dati utili per fasi successive.
- Realizzazione di un software multi-obiettivo, con algoritmi di simulazione e ottimizzazione avanzati. È stata progettata un'interfaccia user-friendly per guidare l'utente nelle funzionalità del sistema.
- Test del servizio condotto nel contesto dell'Università Politecnica delle Marche, per validare i modelli, ottimizzare il design e migliorare l'usabilità.
- Compilazione dell'applicazione in formato web-based.
- Redazione del manuale operativo di funzionamento del software.

7 Dettaglio delle attività svolte

La base conoscitiva necessaria per lo sviluppo del progetto è stata costruita attraverso un'approfondita attività di indagine bibliografica, di mercato, statistica e regolamentare. In primo luogo, questa fase ha permesso di definire l'ambito applicativo del progetto, individuato nel contesto delle CER. Le CER si collocano nel quadro più ampio delle CACER. Per fornire una definizione chiara e univoca delle CACER e delle relative regole applicative, è stata condotta un'analisi dettagliata della normativa vigente (Decreto Del Ministro Dell'ambiente e Della Sicurezza Energetica 7 Dicembre 2023, 2023) (TIAD, 2023). Dallo studio di questi documenti sono emerse le informazioni utili per delineare le configurazioni CACER e orientare l'utente verso la soluzione più conveniente sia economicamente che ambientalmente. L'analisi normativa ha consentito di identificare i criteri di incentivazione economica legati alla condivisione dell'energia rinnovabile che sono stati integrati nelle logiche operative del simulatore. Parallelamente, sono stati individuati gli indici e i parametri fondamentali in campo energetico, forniti da enti come il Gestore dei Mercati Energetici (GME), l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) e l'Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente (ARERA). Questi includono dati aggiornati sui prezzi medi dell'energia, il fattore di emissione medio della rete elettrica e il tasso di sconto. L'integrazione di tali parametri ha reso il simulatore uno strumento accurato e aderente alle condizioni reali del mercato energetico.

Successivamente, è stato effettuato uno studio delle architetture software che ha permesso di analizzare diversi paradigmi e approcci architettonici, valutandone l'idoneità rispetto alle specifiche esigenze del progetto. Tra le varie soluzioni esaminate, l'architettura Model-View-Control (MVC) è risultata la più adatta, grazie alla sua capacità di separare in modo chiaro e strutturato le diverse componenti del sistema quali modelli, viste e controllori. I modelli gestiscono i dati e la logica di business, le viste sono responsabili della presentazione all'utente e i controllori gestiscono l'interazione e il flusso di dati tra le altre componenti. L'architettura MVC è stata adottata per affrontare la complessità degli algoritmi avanzati di simulazione e ottimizzazione propri della logica di business, concentrandoli nei modelli. Parallelamente, l'architettura ha consentito di sviluppare le viste e i controllori in modo indipendente, garantendo che l'interfaccia utente rimanesse semplice, intuitiva e guidata, senza essere influenzata dalla criticità delle logiche sottostanti.

Un'indagine statistica accurata è stata condotta con l'obiettivo di comprendere le abitudini di consumo energetico di diverse categorie di utenti, quali privati cittadini, aziende, hotel, ristoranti e bar (TERNA S.p.A, anni vari) (Schmidt, 2011) (Pasquale, 2019) (ARERA, 2023). Questa analisi non si è limitata a rilevare i consumi energetici totali annuali per ciascuna tipologia, ma ha preso in esame la distribuzione dei consumi su base giornaliera, settimanale e stagionale, fornendo una visione dinamica e multidimensionale dell'utilizzo dell'energia. Sono stati investigati i consumi in relazione a diverse forme di energia – elettrica, termica e frigorifera – per costruire profili dettagliati che riflettano le esigenze energetiche specifiche di ciascun contesto. La raccolta e l'elaborazione di tali dati hanno permesso di identificare picchi di consumo e momenti di bassa domanda, informazioni cruciali per ottimizzare la gestione delle risorse energetiche. Un altro elemento centrale della ricerca è stato lo studio delle caratteristiche tecniche e dei profili di produzione energetica delle fonti rinnovabili e convenzionali (Müller et al., 2015) (Gambarotta & Vaja, 2003) (Castello et al., 2008) (Badami & Portoraro, 2011) (Rienecker et al., 2011) (Fattori et al., 2017) (D'Annibale et al., 2019) (Agostinelli et al., 2020) (de Santoli et al., 2011). È stato posto in evidenza come le diverse fonti possano

essere combinate per rispondere al meglio alle esigenze energetiche dei vari settori in esame definendo le tecnologie da inserire nel database elaborato nella seconda fase delle attività.

In correlazione con le tecnologie energetiche selezionate e con le loro caratteristiche, sono state approfondite le tecniche di ottimizzazione e modellazione nel settore energetico, analizzando i principali metodi utilizzati per affrontare problematiche legate alla gestione delle risorse e all'efficienza dei sistemi. Tra le tecniche valutate, particolare attenzione è stata rivolta agli approcci metaeuristici noti per la loro capacità di risolvere problemi complessi e non lineari in contesti multidimensionali. L'algoritmo Particle Swarm Optimization (PSO) (Kennedy & Eberhart, 1995) implementato attraverso la libreria PySwarms (Lester, 2017) è stato individuato come la soluzione più adatta per il caso specifico. Questa scelta è motivata da diversi fattori distintivi della PSO tra cui l'efficienza nell'esplorazione delle soluzioni che consente all'algoritmo di individuare rapidamente soluzioni ottimali o quasi ottimali; l'adattabilità a problemi che coinvolgono molteplici variabili, come la dimensione degli impianti energetici e la scelta delle tecnologie più efficienti; la facilità di implementazione che permette di integrare l'algoritmo nel sistema con un'efficace gestione dei vincoli e delle configurazioni tecnologiche.

Partendo dall'analisi delle tecnologie di conversione e stoccaggio dell'energia precedentemente esaminate, è stato sviluppato un database che raccoglie le soluzioni considerate. In particolare, il database comprende impianti fotovoltaici, sistemi di cogenerazione e trigenerazione a gas, pompe di calore reversibili e batterie per l'accumulo energetico. Inoltre, viene presa in considerazione anche la connessione alla rete elettrica tradizionale, garantendo un approccio completo e integrato per la gestione delle diverse fonti energetiche.

La terza fase delle attività è stata focalizzata sullo sviluppo del software per simulare i profili di carico energetico e il funzionamento delle colonnine di ricarica per veicoli elettrici. Questo strumento è stato progettato per creare modelli realistici basati sui dati raccolti, permettendo di simulare il comportamento energetico di diverse categorie di utenti e di considerare l'impatto delle infrastrutture per la mobilità elettrica. La realizzazione di tale fase è stata fondamentale per garantire una base solida e integrata alla successiva fase di sviluppo del simulatore multi-obiettivo. I risultati ottenuti, infatti, hanno fornito dati chiave e un framework modellistico necessario per ampliare le funzionalità del simulatore.

Durante la fase di implementazione del software multi-obiettivo, il lavoro è stato organizzato seguendo l'architettura MVC sviluppando in parallelo modelli, viste e controllori attraverso il linguaggio di programmazione Python (*Python Language Reference*, n.d.).

Quindi sono stati definiti tutti gli algoritmi di simulazione e ottimizzazione e le logiche di business necessarie al funzionamento del sistema e sono stati implementati nei modelli.

Sono state progettate e realizzate le viste, con un'interfaccia utente che consente un'interazione intuitiva e agevole. Per garantire un'esperienza completa, sono stati implementati strumenti che permettono all'utente di inserire informazioni tramite box di input numerici, menu a tendina, selettori e altri elementi interattivi. Inoltre, sono stati aggiunti elementi grafici per la presentazione degli output, come grafici a barre e curve, assicurando chiarezza e immediatezza nell'interpretazione dei dati. L'interfaccia è stata adattata per utenti con diversi livelli di esperienza. In termini di implementazione tecnica, le viste sono state realizzate utilizzando la libreria Python Streamlit (Snowflake Inc., 2024).

Sono stati sviluppati i controllori, responsabili di gestire e coordinare le interazioni tra i modelli e le viste. Un controllore superiore è stato inserito per assicurare una gestione simultanea delle due sezioni principali del software: il Simulatore CACER e il Simulatore Multivettore

Energetico. Questo approccio ha permesso di garantire coerenza operativa e un'integrazione efficace tra i vari moduli.

È stato inoltre creato un sistema per la generazione automatica di report scaricabili in formato PDF, contenenti i risultati delle simulazioni e delle ottimizzazioni effettuate.

La quinta fase è stata dedicata ai test del servizio, utilizzando come caso di studio il contesto reale dell'Università Politecnica delle Marche. I dati effettivi sui consumi energetici dell'università sono stati utilizzati come input per il servizio. Questa fase ha quindi svolto un ruolo cruciale non solo nella validazione delle logiche di business sottostanti, ma anche nell'affinamento del design e della funzionalità dell'interfaccia. Infatti, i test hanno evidenziato l'importanza di ottimizzare l'interazione con il sistema, portando all'introduzione di messaggi di aiuto e informative per supportare l'utente durante l'utilizzo. Questi miglioramenti hanno reso l'interfaccia più intuitiva e l'esperienza d'uso più fluida, garantendo una navigazione semplice e guidata che risponde meglio alle esigenze degli utenti.

Dopo aver completato lo sviluppo dell'applicazione e aver effettuato i necessari test di verifica e validazione, è stato generato il link di accesso. Questo passaggio ha segnato il completamento della fase di implementazione e l'avvio dell'operatività del sistema, garantendo un accesso semplice e immediato alla piattaforma.

Infine, è stato realizzato un manuale operativo dettagliato, progettato per fornire all'utente tutte le informazioni necessarie per utilizzare il software in modo efficace e autonomo.

8 Pubblicazioni scientifiche

Nel corso della LA non sono state effettuate pubblicazioni.

9 Eventi di disseminazione

Nel corso della LA non si è partecipato a eventi di disseminazione.

Riferimenti bibliografici e sitografici

- Agostinelli, S., Cumo, F., Pennacchia, E., Sforzini, M., & Tomazzoli, C. (2020). *Analisi di funzionamento di una microgrid energetica basata su produzione di energia elettrica fotovoltaica a servizio di ambiente costruito e mobilità elettrica*.
- ARERA. (2023). *Analisi dei consumi dei clienti domestici*. <https://www.arera.it/dati-e-statistiche/dettaglio/analisi-dei-consumi-dei-clienti-domestici>
- Badami, M., & Portoraro, A. (2011). *Micro-trigenerazione nel settore residenziale con l'utilizzo di motori a combustione interna: Sviluppo di un modello matematico di un assorbitore a bromuro di litio*.
- Castello, S., De Lia, F., Graditi, G., Scognamiglio, A., Zingarelli, L., Schioppo, R., Vivoli, F. P., Signoretti, P., & Spinelli, F. (2008). *Progettare e installare un impianto fotovoltaico*. ENEA Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente.
- D'Annibale, F., Pieve, M., Boccardi, G., Simonetti, L., & Trinchieri, R. (2019). *Sistemi integrati in pompa di calore: Individuazione dei casi studio e simulazione software di sistemi polisorgente con PdC a CO2*.
- de Santoli, L., Basso, G. L., & Caruso, G. (2011). *Calibrazione di un sistema trigenerativo di piccola taglia e modellazione di un sistema innovativo per cogenerazione a miscela di idrogeno*.
- Decreto Del Ministro Dell'ambiente e Della Sicurezza Energetica 7 Dicembre 2023, Pub. L. No. 414 (2023).
- Fattori, F., Anglani, N., Staffell, I., & Pfenninger, S. (2017). High solar photovoltaic penetration in the absence of substantial wind capacity: Storage requirements and effects on capacity adequacy. *Energy*, 137, 193–208. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.007>

- Gambarotta, A., & Vaja, I. (2003). *La cogenerazione* (Campagna Di Informazione, Comunicazione Ed Educazione a Sostegno Delle Fonti Rinnovabili, Del Risparmio e Dell'uso Efficiente Dell'energia). Ministero delle Attività Produttive, Ministero dell'Ambiente e Tutela del Territorio, RENAEL, APAT.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, 4, 1942–1948.
<https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>
- Lester, J. V. M. (2017). *PySwarms: A research toolkit for Particle Swarm Optimization in Python* (Version 0.6)[Computer software]. <https://pyswarms.readthedocs.io/en/latest/>
- Müller, R., Pfeifroth, U., Träger-Chatterjee, C., Cremer, R., Trentmann, J., & Hollmann, R. (2015). *Surface Solar Radiation Data Set—Heliosat (SARAH) (Version 1)* [Dataset].
https://doi.org/10.5676/EUM_SAF_CM/SARAH/V001
- Pasquale, A. D. (2019). *Benchmark di consumo energetico degli edifici per uffici in Italia*. ENEA laboratorio DUEE-SPS-ESE (Domenico Santino, Fabrizio Martini, Silvia Ferrari).
- Python Language Reference* (Version 3.12). (n.d.). [Computer software]. Python Software Foundation. <https://www.python.org>
- Schmidt, H. W. (2011). *Tourism and the environment*.
- Snowflake Inc. (2024). *Streamlit* (Version 1.40.1)[Computer software]. <https://streamlit.io/>
- TERNA S.p.A. (anni vari). *Dati statistici sull'energia elettrica in Italia*.
- Testo Integrato Delle Disposizioni Dell'Autorità Di Regolazione per Energia Reti e Ambiente per La Regolazione Dell'autoconsumo Diffuso (2023).